

**CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA LEVITACION DE MATERIALES  
FERROMAGNÉTICOS EN PRESENCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO  
PRODUCIDO POR UNA BOBINA**

**LUIS FELIPE CASTRILLÓN LARGO  
ANDRES FELIPE GÓMEZ GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELECTRICA  
PEREIRA  
2014**

**CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA LEVITACION DE MATERIALES  
FERROMAGNÉTICOS EN PRESENCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO  
PRODUCIDO POR UNA BOBINA**

**LUIS FELIPE CASTRILLÓN LARGO  
ANDRES FELIPE GÓMEZ GÓMEZ**

**Proyecto de grado  
Para optar el título de  
Tecnólogo en Electricidad**

**Director:  
Ing. Antonio H. Escobar Zuluaga  
Docente Escuela de Tecnología Eléctrica**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELECTRICA  
PEREIRA  
2014**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	8
2. JUSTIFICACIÓN .....	9
3. OBJETIVOS .....	10
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	10
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	10
4. MARCO REFERENCIAL .....	11
4.1. ANTECEDENTES .....	11
4.2. MARCO CONCEPTUAL .....	11
4.3. MARCO TEÓRICO .....	12
4.3.1. CAPÍTULO 1. Estado del arte .....	12
4.3.2. CAPÍTULO 2. Análisis del modelo matemático .....	14
4.3.2.1. Análisis electromagnético del sistema .....	16
4.3.2.2. Análisis de la dinámica del sistema .....	22
4.3.2.3. Identificación de parámetros del sistema .....	25
4.3.3. CAPITULO 3. Diseño del sistema de control. ....	28
4.3.4. CAPITULO 4. Montaje del prototipo.....	34
5. PRUEBAS Y RESULTADOS .....	38
7. CONCLUSIONES .....	44
8. TRABAJOS FUTUROS.....	45
9. BIBLIOGRAFIA .....	48

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Sistema de levitación estable .....	15
Figura 2. Sistema de levitación inestable.....	15
Figura 3. Condición inicial de equilibrio.....	16
Figura 4. Esquema de semejanza al sistema para análisis de circuito magnético.	17
Figura 5. Sistema de suspensión magnética .....	22
Figura 6. Circuito representativo del sistema .....	24
Figura 7. Tendencia de contante de prueba .....	26
Figura 8. Diagrama de bloques sistema a lazo abierto .....	28
Figura 9. Circuito de verificación de posición.....	29
Figura 10. Arquitectura interna del circuito integrado 555.....	30
Figura 11. Circuito PWM con 555 .....	30
Figura 12. Relación de tiempos de carga y descarga con la señal de salida.....	31
Figura 13. Señales con valoración de tensión promedio .....	33
Figura 14. Tendencia de operación del sensor de efecto Hall .....	35
Figura 15. Frontera y región de operación del sistema .....	36
Figura 16. Diseño con dimensiones de marco .....	36
Figura 17. Diseño de presentación .....	37
Figura 18. Medición de desfase y distorsión de señal PWM con transistores tipo TIP NPN de baja frecuencia .....	39
Figura 19. Medición de desfase y distorsión de señal PWM con puente H de alta frecuencia .....	39
Figura 20. Comportamiento de señales PWM con puente H L293D.....	40
Figura 21. Fuentes reguladas con transformador .....	41
Figura 22. Prototipo de levitación electromagnética .....	42
Figura 23. Prototipo final de levitación electromagnética.....	43
Figura 24. Tendencia en el dominio de la frecuencia.....	45
Figura 25. Diagrama de Bode del sistema .....	47

## LISTA DE CUADROS

**Pág**

Cuadro 1. Toma de parámetros .....	26
Cuadro 2. Tabla de verdad FLIP-FLOP R-S .....	30
Cuadro 3. Características de operación del sensor de efecto Hall .....	34
Cuadro 4. Características de operación del electroimán .....	35

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradeciendo a Dios por permitirnos elaborar este proyecto y a todos los profesores que estuvieron en el transcurso de nuestra formación profesional, dejando en nosotros las bases pertinentes para nuestra proyección profesional.

De manera formal le agradecemos a Andrés Felipe Panesso (Exdocente programa de Tecnología Eléctrica), John Jaime Robby Goez (Exdocente programa de Tecnología Eléctrica), Sigilfredo Arregoces Campo (Docente programa de Tecnología Eléctrica), Juan Carlos Tamayo Payan (Administrativo UTP), Wilson Pérez Castro (Docente programa de Tecnología Mecánica) quienes participaron de forma activa en el proceso de construcción del proyecto.

## RESUMEN

Desde la antigüedad el electromagnetismo, y en particular, los efectos a distancia que se derivan de su aplicación, ha sido un tema atractivo de investigación. Los descubrimientos de los físicos Hans Christian Oersted y Michael Faraday, realizados en el siglo XIX, establecieron vínculos muy estrechos entre electricidad y magnetismo. La combinación adecuada de los efectos de los campos eléctricos y magnéticos ha permitido la invención de equipos muy útiles para el desarrollo de la humanidad. Entre estos elementos podemos nombrar al motor, al generador y al transformador eléctrico como grandes exponentes. Se puede afirmar que la teoría electromagnética y su aplicación ha cambiado los hábitos de las personas y ha influido en distintos aspectos de su vida. Las comunicaciones, el computador y el transporte son sólo algunos aspectos que han cambiado gracias a la electricidad y el magnetismo. Un aspecto que no deja de sorprender al hombre es la posibilidad de diseñar sistemas donde se aplica la levitación magnética, es decir, dispositivos donde las fuerzas de origen magnético contrarrestan las fuerzas gravitacionales. Un ejemplo de esto es el tren de levitación MAGLEV usado para transporte masivo de personas a altas velocidades.

A partir de los conceptos básicos asociados y de los antecedentes, en este trabajo se diseña y se construye un sistema de levitación electromagnética. Inicialmente se presenta el modelo matemático del sistema y se plantea un esquema sensor magnético, actuador e imán, que permita mantener un imán de neodimio suspendido en un campo magnético que interactúa con el campo gravitacional terrestre. Se analiza por separado la fuerza magnética que produce una bobina con corriente, la fuerza atractiva magnética entre el imán y la bobina, y la fuerza asociada al peso del imán y posteriormente se combinan para encontrar la condición de equilibrio. Desde el punto de vista práctico es necesario determinar la respuesta del sensor que se usa, el cual permite determinar la posición del imán cuando se encuentra suspendido. Se utiliza un sensor de efecto Hall. También se determina la relación entre la masa del imán y la corriente necesaria en la bobina para atraerlo hacia ella. Finalmente se determina la resistencia y la inductancia de la bobina para encontrar la relación entre la tensión aplicada a la bobina y la corriente resultante en ella. Al final se construye un prototipo demostrativo que permite probar lo que se muestra teóricamente.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La teoría electromagnética abarca temas como: Teoría de campos, análisis de vectores en el espacio, vectores superficie, condiciones de existencia de un campo magnético, relación entre campos magnéticos y líneas de inducción, flujo magnético, ley de Gauss del magnetismo, fuerza sobre cargas, fuerza sobre conductores con corriente, fuerza magnética sobre corriente, momento o torque magnético, ley de Ampere, ley de Biot-Savart, ley de inducción de Faraday, ley de Lenz, ley de la conservación de la energía, campos magnéticos en medios materiales, materiales y propiedades magnéticas, corrientes de Eddy, circuitos magnéticos, estos entre los más importantes, y una de las aplicaciones más estudiadas en el tema de transporte es la **levitación electromagnética**.

En la Escuela de Tecnología Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, se dicta en forma magistral la asignatura Electromagnetismo pero desafortunadamente se tiene muy poco material didáctico para la comprensión de los fenómenos electromagnéticos, hasta el momento sólo se ha desarrollado un trabajo de grado el cual consiste en la interpretación del fenómeno de energía inalámbrica basada en los principios de la bobina de Tesla (1).

Con el desarrollo de este trabajo de grado se pretende hacer un prototipo de **levitación electromagnética** en el que se pueda observar la interacción de los campos magnéticos con cuerpos de material ferro-magnético, en donde se presenta la aplicación de los conceptos fundamentales, y en el que se considerarán las siguientes etapas:

- Estado del arte
- Planteamiento del modelo matemático
- Diseño del sistema de control
- Montaje del prototipo de levitación electromagnética



## **2. JUSTIFICACIÓN**

La levitación electromagnética consiste en la suspensión de objetos en presencia de un campo magnético. Actualmente, funciona comercialmente el Tren Maglev (2), que consiste en un sistema de transporte que incluye la suspensión, guía y propulsión sobre unos rieles los cuales se conforman principalmente de bobinas (electroimanes).

Con el desarrollo del prototipo de un sistema de levitación electromagnética en forma estable, se pretende mostrar la aplicación de la teoría electromagnética a los estudiantes pudiendo llegar al entendimiento de los principios básicos de estos sistemas, en el cual se podrán beneficiar los estudiantes y la Escuela de Tecnología Eléctrica ya que de esta manera se tendrá material con el cual realizar una interacción práctica y de esta manera corroborar la teoría con la práctica.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Construir un prototipo para levitación de materiales ferromagnéticos en presencia del campo magnético producido por una bobina

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Revisar el estado del arte del principio de levitación electromagnética.
- Analizar el modelo matemático
- Diseñar el sistema de control que mantenga un cuerpo metálico a una distancia adecuada por medio de sensores.
- Presentar el prototipo de un sistema de levitación electromagnética.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. ANTECEDENTES

- En (1) se presentó un proyecto de grado en donde se muestra el concepto de energía inalámbrica, basada en la ley de inducción de Faraday, tomando como base la construcción de una bobina de Tesla.
- En (2) se describieron los principios matemáticos fundamentales del comportamiento de sistemas de levitación magnética; además, se presentó la elaboración del sistema de control de estabilidad del cuerpo metálico.
- En (3) se desarrolló y se explicó el funcionamiento de diferentes tipos de sensores; además, se presentó un modelo de control para un levitador magnético.
- En (4) se hizo una tesis de maestría la cual muestra el modelo matemático de la segunda ley de Newton aplicada a un sistema de levitación electromagnética, con la cual se explica la transición de un principio de fenómenos mecánicos a un fenómeno eléctrico.
- En (5) se realizó un análisis de control de un sistema de levitación electromagnético en donde se muestran los parámetros necesarios para la identificación del dinamismo del sistema, teniendo en cuenta los parámetros naturales establecidos por el medio en el que está presente el cuerpo en suspensión.

### 4.2. MARCO CONCEPTUAL

**Electro-imán:** “es un tipo de imán en el que el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica, desapareciendo en cuanto cesa dicha corriente” (6).

**Bobina:** “Son componentes pasivos de dos terminales que generan un flujo magnético cuando se hacen circular por ellas una corriente eléctrica”(7).

**Ferromagnetismo:** “El ferromagnetismo es un fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido. Un material ferromagnético es aquel que puede presentar ferromagnetismo. La interacción ferromagnética es la interacción magnética que hace que los momentos magnéticos tiendan a disponerse en la misma dirección y sentido. Ha de extenderse por todo un sólido para alcanzar el ferromagnetismo” (8).

**Sensor:** “Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como en un fototransistor)” (9).

**Dinamo:** es un generador eléctrico destinado a la transformación de flujo magnético en electricidad mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, generando una corriente eléctrica(10) .

**Magnetización:** es la densidad de momentos dipolares magnéticos que son magnetizados por el metal (11).

**Joint-venture:** es un tipo de acuerdo comercial de inversión conjunta a largo plazo entre dos o más personas (normalmente personas jurídicas o comerciantes) (12).

**Thyssenkrupp:** es una industria siderúrgica alemana y es la empresa más importante en el país dedicada a la fundición y forja del acero (13).

## **4.3. MARCO TEÓRICO**

### **4.3.1. CAPÍTULO 1. Estado del arte**

El ser humano y su afán de explicar los fenómenos de la naturaleza y buscar una explicación al mismo, hicieron que el magnetismo no pasara desapercibido y llamo la atención de los seres humanos desde la Antigüedad, resaltando que los fenómenos magnéticos fueron caracterizados inicialmente por los antiguos griegos, iniciando la inquietud tras el descubrimiento de las primeras piedras magnéticas en la ciudad de Magnesia del Meandro, en Asia Menor, donde el nombre de dicha ciudad fue el motivo del término magnetismo.

A lo largo de la historia de la humanidad el fenómeno magnético ha tenido una presencia en diferentes aspectos, desde fenómenos naturales como las tormentas magnéticas, la aurora boreal en los polos y el campo magnético terrestre y de manera artificial objetos de la vida cotidiana como la televisión, el teléfono, la grabadora, el timbre y los detectores de metales, de hecho el campo magnético terrestre condiciona a ciertos animales y plantas en aspectos físicos o biológicos, por ejemplo los musgos que siempre crecen orientados hacia el norte, o animales como es el caso de las rayas o las palomas mensajeras, que presentan cambios en su forma de orientarse o en sus comportamientos, así lo afirma el Doctor Frank Brown de la Universidad de Northestern, tras más de 20 años de investigaciones.

La cirugía también se ha visto beneficiada de esta propiedad de la naturaleza, por ejemplo en los hospitales, pueden utilizar un electroimán para extraer esquilas del cuerpo humano o cualquier ser vivo.

Los primeros inventos con magnetismo fueron las brújulas. En el siglo X, navegantes chinos y europeos emplearon brújulas magnéticas como el científico Shen Kua (1031-1095) que escribió sobre la brújula de aguja magnética y mejoró la precisión en la navegación empleando el concepto astronómico del norte absoluto. Hacia el siglo XII el imperio chino ya había desarrollado la técnica lo suficiente como para utilizar la brújula para mejorar la navegación. Alexander Neckham fue el primer europeo en conseguir desarrollar esta técnica en 1187.

El primer estudio científico sobre la magnetita lo realizó Pierre Pelerin de Malicourt (siglo XIII) que definió los polos magnéticos y las leyes de la atracción y repulsión. Posteriormente, William Gilbert en su obra *De magnete* (1600) describió las propiedades de los imanes y fue el primero en considerar que la Tierra era un gigantesco imán. Este punto de vista estableció una base racional para comprender el movimiento de la aguja de la brújula y su atracción hacia los polos Norte y Sur, un aspecto crítico en el avance de la navegación.

En 1750, el británico John Michell inventó una balanza que utilizó para estudiar las fuerzas magnéticas que le permitió medir el efecto llamado *fuerza de gravedad* que aplicaría en objetos situados en el laboratorio. En 1831 el científico británico Michael Faraday (1791-1867) hizo otro descubrimiento trascendental: que el movimiento de un imán en las proximidades de un cable induce en éste una corriente eléctrica, este efecto era inverso al hallado por Oersted. Ambos descubrimientos están relacionados con el motor eléctrico y los generadores de corrientes, de ahí su importancia para la vida moderna. Oersted, por su parte, demostró que una corriente eléctrica crea un campo magnético mientras que Faraday demostró que puede emplearse un campo magnético para crear una corriente eléctrica (principio de inducción de la corriente eléctrica). El teléfono y el telégrafo, alrededor de 1880, eran aparatos activados por baterías y basados en el descubrimiento de Oersted. Las grandes aplicaciones a la ingeniería de la inducción electromagnética son el motor eléctrico y la dínamo. El mismo Henry, codescubridor de la inducción electromagnética construyó un motor en 1831 y Edison inventó un generador bipolar en 1878, un año antes de inventar el uso de luz eléctrica. Asimismo, aparatos como la radio y la televisión utilizan muchos de los conocimientos relacionados con el electromagnetismo.

Una de las aplicaciones más conocidas y desarrolladas en la actualidad de la levitación magnética es el uso en el sector de los trenes, dando lugar a lo que se conoce como tren de levitación magnética o también denominado "MAGLEV". Se trata de un tren suspendido en el aire por encima de una vía siendo propulsado hacia adelante por medio de las fuerzas repulsivas y atractivas del magnetismo

mediante el uso de una serie de imanes colocados estratégicamente. Este estado de suspensión limita el rozamiento del convoy, permitiendo a este sistema ferroviario alcanzar velocidades casi imposibles de conseguir en un ferrocarril convencional. Tiene un potencial de velocidad como los turbohélice y las aeronave jet (900 km/h). El record de velocidad lo tiene Japón y es de 581 km/h registrado en el año 2003, pero se han conseguido en prototipos velocidades de hasta 600 km/h. Así por tanto, este método tiene el potencial de ser rápido y tranquilo en comparación con los trenes clásicos de ruedas y en general con los sistemas de transporte masivos de ruedas. Esta tecnología lleva muchos años en desarrollo, pero el alto coste de este tipo de infraestructuras ha limitado su implantación.

Para los sistemas de levitación se tienen los siguientes tipos de suspensión.

*Suspensión electromagnética (EMS):* Permite altas velocidades y genera campos magnéticos poco peligrosos. Tiene un alto coste de producción y explotación por lo que la hace poco rentable.

*Suspensión electrodinámica (EDS):* Permite altas velocidades y altas cargas de peso. Utiliza superconductores de alta temperatura HTS que deben ser refrigerados con nitrógeno. Los campos magnéticos generados son altamente perceptibles dentro y fuera del tren, lo cual imposibilita su uso a personas con marcapasos. Debe dotarse con ruedas para los trayectos en los que se mueve a poca velocidad. El coste por kilómetro es gigantesco.

*Suspensión con imanes permanentes (Inductrack):* Se trata de un sistema con menores costes de explotación debido a que no necesita corriente para proveer la levitación. El campo magnético permanente garantiza la suspensión en caso de fallo eléctrico. Los trenes deben dotarse de ruedas para proveer la propulsión. El primer sistema comercial de trenes MAGLEV existente en el mundo se está desarrollando por la compañía alemana Transrapid International, una joint-venture de los grupos industriales Siemens y Thyssenkrupp.

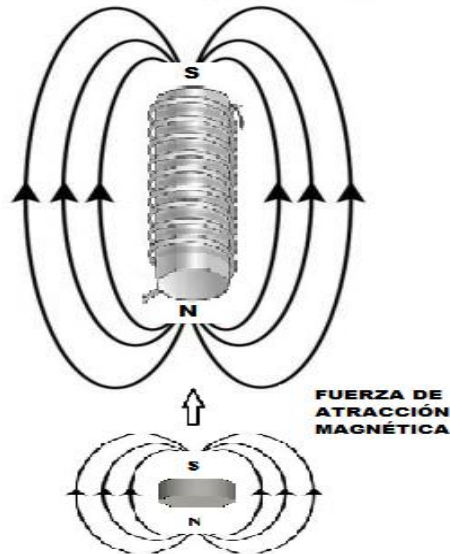
#### **4.3.2. CAPÍTULO 2. Análisis del modelo matemático**

En los sistemas de levitación se toman los conceptos de dispersión de líneas de campo magnético, en donde estas viajan por medio de aire, tomando el sentido Norte – Sur del imán o en este caso del electroimán. En los imanes los polos están establecidos naturalmente, lo que hace que no se puedan cambiar sin mover el cuerpo del mismo, en los electroimanes el campo magnético se genera gracias a una corriente inyectada a la bobina, lo que genera polos en sus extremos, los cuales cambian de ubicación dependiendo del sentido de la corriente que fluye por la misma. Para la identificación de la dirección de campo se puede verificar con la regla de la mano derecha.

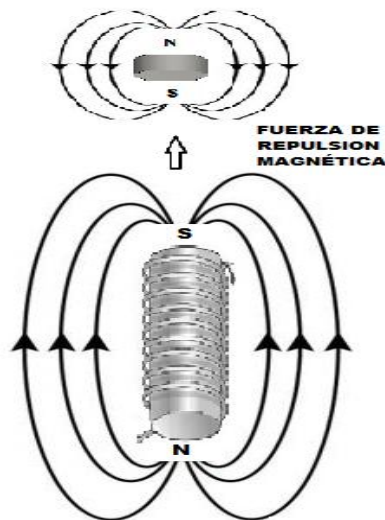
**Regla de la mano derecha para electroimanes:** Se ubican los dedos en dirección de flujo de la corriente inyectada y el pulgar refleja la dirección de salida del campo magnético y del mismo modo pautando el Norte del mismo.

Para el análisis de modelos de levitación electromagnética se tienen en cuenta que hay dos formas de ubicación de sistema, utilizando fuerzas de atracción magnética (sistema estable) o fuerzas de repulsión magnética (sistema inestable) como se muestra en la Figura 1 y Figura 2, teniendo en cuenta que el cuerpo en suspensión es de material magnético (imán).

**Figura 1. Sistema de levitación estable**

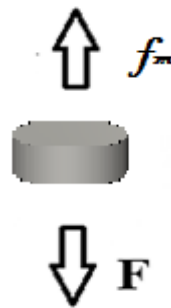


**Figura 2. Sistema de levitación inestable**



El fenómeno de levitación electromagnética, está basado en la interacción de campos magnéticos generados por medio de corrientes en un conductor (Henry Oersted), en el que se puede evidenciar los efectos de atracción sobre elementos de material ferromagnético, produciendo de esta manera un efecto de levitación al ubicar el electroimán enfrentado al cuerpo a una distancia determinada, en donde el campo magnético generado atraiga el cuerpo y se mantenga suspendido a una distancia controlada por sensores y sistemas de control, donde el propósito fundamental es generar la condición inicial de equilibrio sobre el cuerpo como se muestra en la Figura 3.

**Figura 3. Condición inicial de equilibrio**



$F_{Tm}$     Fuerza resultante  
 $F$         Fuerza mecánica de origen gravitacional  
 $F_m$        Fuerza mecánica de origen magnética

$$F_{Tm} = |F - f_m| \quad (1)$$

Donde el resultado a esperar es  $F_{Tm} = 0$  para cumplir con la condición inicial de equilibrio sobre el cuerpo, de allí que:

$$f_m = F \quad (2)$$

#### **4.3.2.1. Análisis electromagnético del sistema**

Para comprender un poco lo que pasa en el sistema de levitación electromagnética, se hace el análisis del sistema por medio de circuitos magnéticos, el cual nos permite identificar la fuerza mecánica de origen magnética referida a un sistema y el comportamiento de sus componentes. Se habla de circuito magnético cuando se desea obtener en una región determinada por un material ferromagnético, un flujo magnético, para el cual es preciso poder calcular la inducción magnética (H) y campo magnético (B) en todos los puntos de la estructura, donde ambas magnitudes son funciones del espacio tiempo determinada por la geometría de los conductores y de la estructura magnética, teniendo en cuenta que es un problema que contiene materiales de características no lineales, una de las soluciones de este problema general, en una región

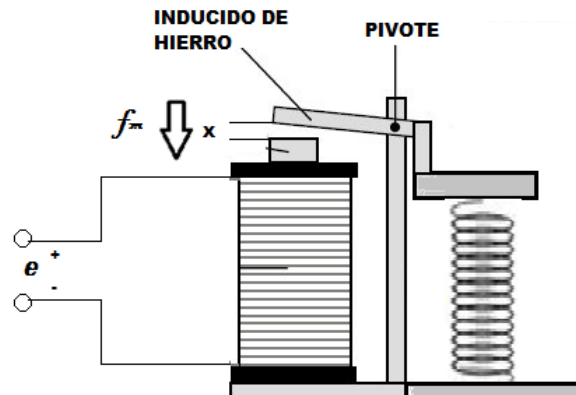


determinada del espacio, exige que se satisfaga simultáneamente las tres condiciones siguientes:

- La inducción magnética ( $H$ ) es igual en todos los puntos al campo magnético ( $B$ ) dividido por la permeabilidad ( $\mu$ ), que es, en general, una variable dependiente de  $B$ .
- La integral de la componente normal de  $B$  extendida a una superficie cerrada de la región, debe ser nula.
- La integral de la componente tangencial de  $H$  a lo largo de un contorno cerrado cualquiera de la región, ha de ser igual a  $4\pi i$ , siendo  $i$  la intensidad de corriente circulante por el contorno.

Uno de los problemas que se presentan se puede resolver fácilmente al momento de conocer el campo magnético y el de obtener el flujo magnético total  $\Phi$  que atraviesa la superficie, este flujo no es más que una componente de  $B$  normal a la superficie de la estructura, integrada en los límites establecidos de la misma.

**Figura 4. Esquema de semejanza al sistema para análisis de circuito magnético**



En la Figura 4 se muestra un símil del sistema de levitación electromagnética, en donde la fuerza mecánica de origen gravitacional se ve representada por un resorte, de esta manera se puede dar un reflejo del análisis matemático para la formulación de la fuerza mecánica de origen magnética necesaria para la atracción del cuerpo enfrentado. El brazo soportado en el pivote se puede alejar y contraer en dirección a la cara del núcleo de la bobina quien presenta una distancia inicial  $x$ .

Se puede calcular la fuerza requerida para desplazar el brazo, contra la fuerza de atracción magnética, aplicando el concepto del principio de la conservación de la energía al sistema, si en el sistema se produjeran cambios en la energía total se vería reflejada la ecuación de la conservación de la energía, que es:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{eléctrica} \\ \text{suministrada} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{mecánica} \\ \text{suministrada} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Aumento de la} \\ \text{energía} \\ \text{almacenada} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Energía convertida} \\ \text{irreversiblemente} \\ \text{en otras formas} \end{array} \right] \quad (3)$$

Considerando cada término de la ecuación anterior, cuando se aumenta el entrehierro en una razón de cambio ( $dx$ ) durante un tiempo ( $dt$ ) a causa de una fuerza  $f_m$  la energía eléctrica suministrada ( $dW_e$ ) es:

$$dW_e = e idt = N \frac{d\phi}{dt} * idt = N id\phi \quad (4)$$

$e$  Diferencia de potencial que aparece en los terminales de la bobina.  
 $d\phi/dt$  Variación del flujo debido al aumento de reluctancia.  
 $d\phi$  Variación total del flujo durante un tiempo.

La energía mecánica suministrada  $dW_m$  está definida por:

$$dW_m = f_m dx \quad (5)$$

$dx$  Variación de la distancia durante un tiempo

Se tiene en cuenta que para la condición de equilibrio la fuerza mecánica de origen magnético ejercida  $f_m$  es igual a la fuerza mecánica ejercida  $F$ .

La energía almacenada en el sistema ( $W_s$ ) es en forma de energía magnética, el incremento de esta energía ( $dW_s$ ) contiene dos componentes, el incremento de la energía en el hierro ( $dW_{si}$ ) y el incremento de energía en el aire del entrehierro ( $dW_{sa}$ ). Teniendo en cuenta el volumen del núcleo, la energía entregada al campo magnético ( $dW$ ) es:

$$dW = \frac{V}{4\pi} H dB \quad (6)$$

$V$  Volumen  
 $H$  Inducción magnética  
 $dB$  Variación del campo

Lo que indica que la energía entregada al campo magnético no depende del tiempo que tarda en variar una cantidad, es decir, la cantidad de energía entregada al campo magnético depende únicamente de la variación de  $B$  y no de la velocidad con la que se produce dicha variación.

De lo anterior se dice que el incremento en el hierro está definido por:

$$dW_{si} = \frac{V_i}{4\pi} H_i dB_i \quad (7)$$

$V_i$  Volumen del hierro  
 $H_i$  Inducción magnética en el hierro  
 $dB_i$  Variación del campo en el hierro

El incremento en el aire del entrehierro se debe tanto a la variación de la inducción magnética en el entrehierro ( $B_a$ ), como en la variación del volumen del entrehierro ( $V_a$ ) la mejor manera de obtenerlo es derivando con respecto a  $x$  la expresión de la energía total almacenada ( $W$ ).

$$W = \frac{B^2}{8\pi\mu} \quad (8)$$

$\mu$  Permeabilidad del material

De la ecuación 8, se obtiene la expresión de la energía total almacenada en el entrehierro ( $dW_{sa}$ ), después de multiplicar por el volumen del entrehierro y derivando con respecto a  $x$  la expresión.

Donde:

$$W_{sa} = \frac{V_a B_a^2}{8\pi\mu_0} \quad (9)$$

$\mu_0$  Permeabilidad del aire ( $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$ )

Derivando con respecto a  $x$  se obtiene que:

$$\frac{dW_{sa}}{dx} = \frac{B_a^2}{8\pi\mu_0} \cdot \frac{dV_a}{dx} + \frac{2V_a B_a}{8\pi\mu_0} \cdot \frac{dB_a}{dx} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que el volumen del entrehierro está definido por:

$$V_a = A_a x \quad (11)$$

$A_a$  Área de la sección recta del entrehierro

El diferencial de almacenamiento de energía en el entrehierro a lo largo de la variación de la distancia ( $dx$ ) será igual a la expresión de la ecuación 10 multiplicada por  $dx$ , es decir:

$$\frac{dW_{sa}}{dx} dx = dW_{sa} \quad (12)$$

Por lo tanto se obtiene que:

$$dW_{sa} = \frac{B_a^2}{8\pi\mu_0} \cdot dV_a + \frac{V_a B_a}{4\pi\mu_0} \cdot dB_a \quad (13)$$

Como diferencial de volumen se tiene:

$$dV_a = A_a dx \quad (14)$$

Reemplazando en la ecuación 13

$$dW_{sa} = \frac{B_a^2}{8\pi\mu_0} \cdot A_a dx + \frac{V_a B_a}{4\pi\mu_0} \cdot dB_a \quad (15)$$

Como

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0} \quad (16)$$

Despejando la permeabilidad y reemplazando en la ecuación 15

$$dW_{sa} = \frac{H_a B_a A_a}{8\pi} \cdot dx + \frac{V_a H_a}{4\pi} \cdot dB_a \quad (17)$$

La energía convertida irreversiblemente en otras formas presentes en la ecuación de la conservación de la energía, contiene la conversión de calor por la energía eléctrica o magnética, a causa por la histéresis y corrientes de Foucault, lo que hace que este término se considere nulo.

De lo anteriormente dicho se reemplaza, utilizando las ecuaciones 4, 5, 7, 17, en la ecuación de la conservación de la energía y se obtiene que:

$$dW_e + dW_m = dW_{si} + dW_{sa} + 0 \quad (18)$$

De lo que se obtiene que:

$$Nid\phi + f_m dx = \frac{V_i}{4\pi} H_i dB_i + \frac{H_a B_a A_a}{8\pi} \cdot dx + \frac{V_a H_a}{4\pi} \cdot dB_a \quad (19)$$

Para una visualización más clara y conservando la terminología se expresa  $Nid\phi$  en términos de campo magnético, inducción magnética, en el hierro y el entrehierro de la siguiente manera:

$$4\pi Ni = H_a x + H_i L_i \quad (20)$$

$L_i$  Longitud total de recorrido del flujo en el hierro

Teniendo en cuenta que:

$$d\phi = A_i dB_i = A_a dB_a \quad (21)$$

De la ecuación 20 se despeja la expresión  $Ni$ , se multiplica por  $d\phi$  y se reemplaza dicho término por el equivalente respectivo mostrado en la ecuación 22, obteniéndose la expresión (22)

$$Nid\phi = \frac{A_i L_i H_i dB_i + A_a x H_a dB_a}{4\pi} \quad (22)$$

Sustituyendo la ecuación 22 en la ecuación 19, se obtiene reduciendo términos semejantes y dividiendo entre  $x$  la expresión de la fuerza mecánica de origen magnético.

$$f_m = \frac{H_a B_a A_a}{8\pi} \quad (23)$$

Cambiando el valor de la inducción magnética por su equivalente se tiene que la fuerza mecánica de origen magnética es:

$$f_m = \frac{B_a^2 A_a}{8\pi\mu_0} \quad (24)$$

Como resultado se obtiene la ecuación característica de la fuerza mecánica de origen magnético en función del campo y del área del entrehierro, lo que permite relacionar que al aumento de campo se observaría que el área del entrehierro disminuye y viceversa. Para una comprensión más detallada de lo que pasa ante la variación de la distancia del entrehierro con respecto al campo magnético se tiene en cuenta que el la magnitud del campo magnético es inversamente proporcional a la distancia del entrehierro  $(B \propto \frac{1}{x})$ .

Teniendo en cuenta que el campo magnético es proporcional a la corriente inyectada se puede decir que:

$$B = Ki \quad (25)$$

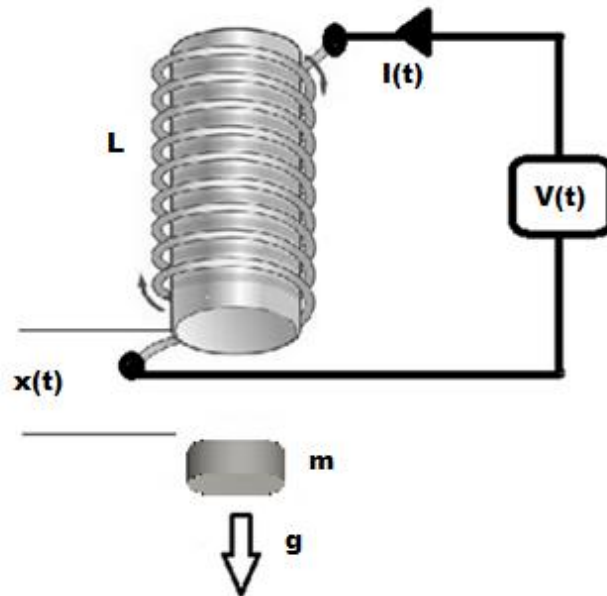
Donde  $K$  es una constante de magnetización referida a los términos constantes de la ecuación 24.

#### 4.3.2.2. Análisis de la dinámica del sistema

Para efectos del análisis de la dinámica del sistema se plantea un nuevo modelo de análisis, teniendo presente que un modelo matemático no es único para un sistema determinado, motivo por el cual se puede tener muchos modelos matemáticos dependiendo de cada perspectiva.

Para describir la dinámica de muchos sistemas físicos en términos de ecuaciones diferenciales se obtienen a partir de las leyes físicas que gobiernan un determinado sistema, algunos ejemplos de leyes físicas aplicables serían las leyes de Newton para sistemas mecánicos y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos.

Figura 5. Sistema de suspensión magnética



Dónde:

- $x(t)$  Distancia entre el electroimán y el imán
- $v(t)$  Tensión de alimentación del electroimán
- $i(t)$  Corriente circulante por el electroimán
- $R_L$  Resistencia del electroimán
- $L$  Inductancia del electroimán
- $m$  Masa del cuerpo
- $g$  Aceleración gravitacional

Para el modelo matemático de un levitador se tiene en cuenta la segunda ley de Newton (Ley de Fuerza) para la parte mecánica del sistema, en la que se evidencia la interacción de una masa y de su aceleración en la fuerza ejercida sobre un cuerpo, de donde se tiene que:

$$F = ma \quad (26)$$

Se sabe que la aceleración sobre el cuerpo está dada por la gravedad presente en el medio, obteniendo que:

$$F = mg \quad (27)$$

Donde la aceleración está definida como la segunda derivada de la distancia con respecto al tiempo.

$$F = m \frac{d^2 x(t)}{d^2 t} \quad (28)$$

De la Figura 5

Figura 5, la ecuación 24 y ecuación 25, la fuerza mecánica de origen magnético generada por una corriente circulante en la bobina está dada por:

$$f_m = \frac{K_m i(t)^2}{x(t)^2} \quad (29)$$

$F_m$       Fuerza mecánica de origen magnética  
 $y(t)$     Distancia entre el electroimán y el imán  
 $i(t)$     Corriente circulante por el electroimán  
 $K_m$       Constante magnética del imán

Partiendo de la ecuación 2 y reemplazando por los valores obtenidos en las ecuaciones 27 y 29, se puede observar que:

$$\frac{K_m i(t)^2}{x(t)^2} = mg \quad (30)$$

Donde la distancia requerida se tendría como:

$$x(t) = \sqrt{\frac{K_m}{mg}} i(t) \quad (31)$$

Para establecer los parámetros de la función de transferencia del sistema, se establece las relaciones de entrada (tensiones) y salida (corrientes y tensiones) en términos de distancia.

La corriente en una inductancia está definida por:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int V_L(t) dt \quad (32)$$

Por lo tanto se despaja la corriente en términos de la distancia, a partir de la ecuación 29, de allí que la tensión en la inductancia en términos de la distancia será.

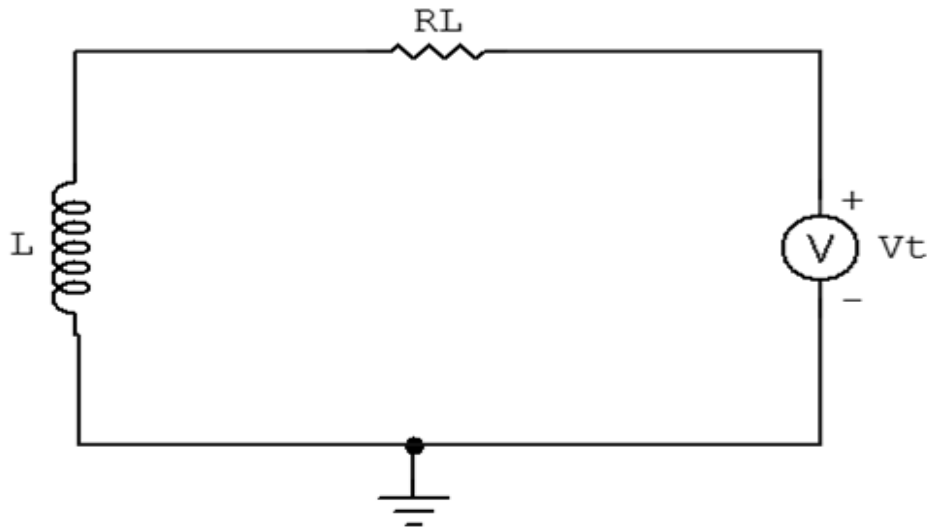
$$V_L(t) = L \sqrt{\frac{mg}{K_m}} \frac{dx(t)}{dt} \quad (33)$$

De lo anterior también se deduce que la tensión en la resistencia del electroimán en términos de la distancia sería:

$$V_R(t) = R_L \sqrt{\frac{mg}{K_m}} x(t) \quad (34)$$

Con los parámetros hallados se llega al siguiente modelo circuital, como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6. Circuito representativo del sistema**



Se tiene que la fuerza total del sistema está definida como la sumatoria de fuerzas en el mismo.

$$F_T = \sum F \quad (35)$$



Con esto podemos afirmar que la sumatoria de fuerzas se puede hacer como símil a la ley de sumatoria de tensiones de Kirchhoff, donde se afirma que la fuerza total del sistema está dada por la tensión suministrada  $V(t)$  y partiendo de que  $F_m = F$  se obtiene la ecuación de estados en función de la distancia.

$$V(t) = V_L + V_R \quad (36)$$

Reemplazando:

$$V(t) = L \sqrt{\frac{mg}{K_m}} \frac{dx(t)}{dt} + R_L \sqrt{\frac{mg}{K_m}} x(t) \quad (37)$$

Transformando al dominio de la frecuencia se puede deducir que:

$$V(s) = +L \sqrt{\frac{mg}{K_m}} s x(s) + R_L \sqrt{\frac{mg}{K_m}} x(s) \quad (38)$$

Teniendo como función de transferencia en forma canónica:

$$G(s) = \frac{x(s)}{V(s)} = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{mg}{K_m}}\right) LS + \left(\sqrt{\frac{mg}{K_m}}\right) R_L} \quad (39)$$

#### 4.3.2.3. Identificación de parámetros del sistema

- Identificación de la constante magnética  $K_m$

Para la identificación de la constante magnética se lleva el electroimán a una serie de pruebas básicas de medición de distancia en comparación con los niveles de tensión suministrados al electroimán y la corriente asociada al mismo, de tal manera que se puedan observar los valores de distancia y corriente, ya que son variables en la ecuación 38.

$$K_m = \left( \frac{x^2(t)}{i(t)} \right) mg \quad (40)$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

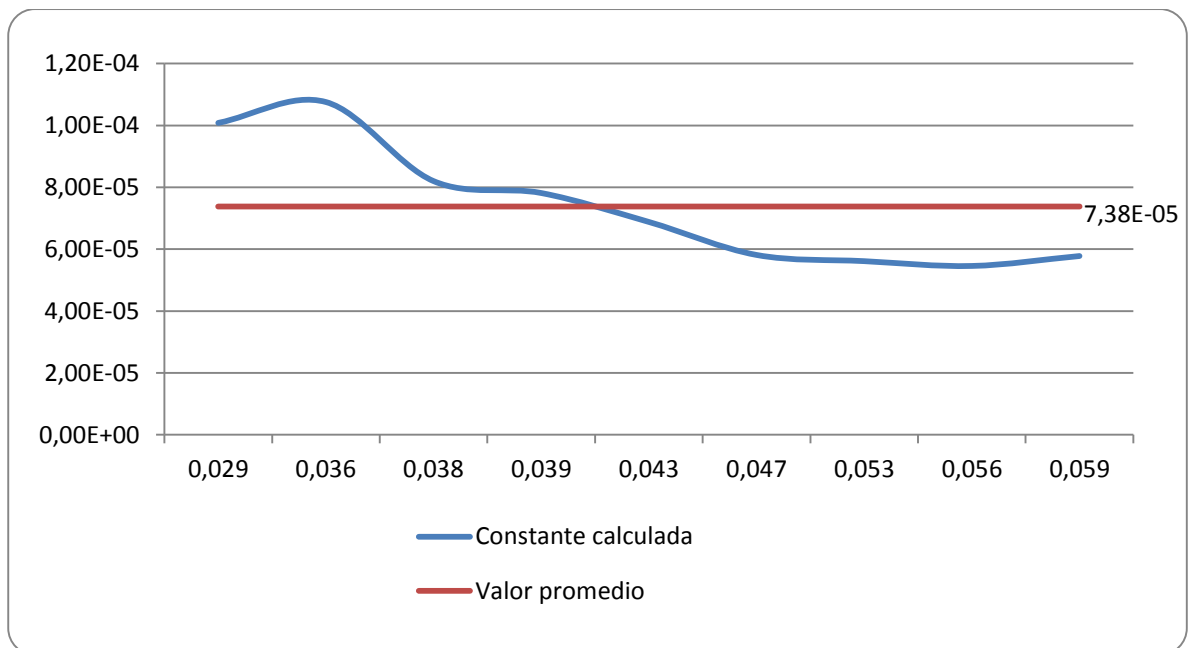
Con los valores obtenidos en el Cuadro 1, se realiza el cálculo de la constante magnética.

**Cuadro 1. Toma de parámetros**

D (m)	Tensión (V)	Corriente (A)	K <sub>m</sub>
0,029	4,1	0,09	1,01E-04
0,036	6	0,13	1,08E-04
0,038	8,2	0,19	8,20E-05
0,039	9,4	0,21	7,82E-05
0,043	13	0,29	6,88E-05
0,047	18,1	0,41	5,81E-05
0,053	24,1	0,54	5,61E-05
0,056	28	0,62	5,46E-05
0,059	30	0,65	5,78E-05

Se grafica la tendencia de la constante magnética, como se muestra en Figura 7.

**Figura 7. Tendencia de constante de prueba**



Donde el valor establecido para la constante K<sub>m</sub> está definido por el promedio de los valores hallados anteriormente, de tal manera que el valor a utilizar en el sistema será:

$$K_m = 7,38 \times 10^{-5}$$

- **Identificación de los parámetros R y L de la bobina**

Para la identificación de estos parámetros se utilizaron medidores de parámetros (puentes LCR) que nos permite establecer los valores a utilizar en la implementación del diseño, y permitiendo además la escogencia de una frecuencia establecida para la medición de los parámetros que es de 1 kHz (frecuencia estándar), por lo tanto para la concordancia del diseño se trabaja con la frecuencia de 1 kHz, ya que nos da mayor estabilidad y rapidez al momento de la implementación del sistema, tomando como R serie y L serie valores de referencia.

Los valores obtenidos por los medidores de parámetros son:

**FLUKE PM6303A**

$$R_s = 264 \, \Omega$$

$$L_s = 285,7 \, \text{mH}$$

**BK precisión model 878B / 879B**

$$R_s = 265,2 \, \Omega$$

$$L_s = 288,42 \, \text{mH}$$

**Puente LCR portátil MX - 1010**

$$R_s = 264,7 \, \Omega$$

$$L_s = 287 \, \text{mH}$$

De los valores medidos se toman los valores promedios para establecer el parámetro de utilización y generalizando el valor del error de medición de cada implemento. De esta manera se obtienen los siguientes valores:

$$R_L = 264,63 \, \Omega$$

$$L = 287,04 \, \text{mH}$$

En resume se obtienen para los parámetros a implementar en la función de transferencia los valores de:

$$m = 0,0011 \, \text{kg} \quad K_m = 7,38 \times 10^{-5} \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$R_L = 264,63 \, \Omega$$

$$L = 287,04 \, \text{mH}$$

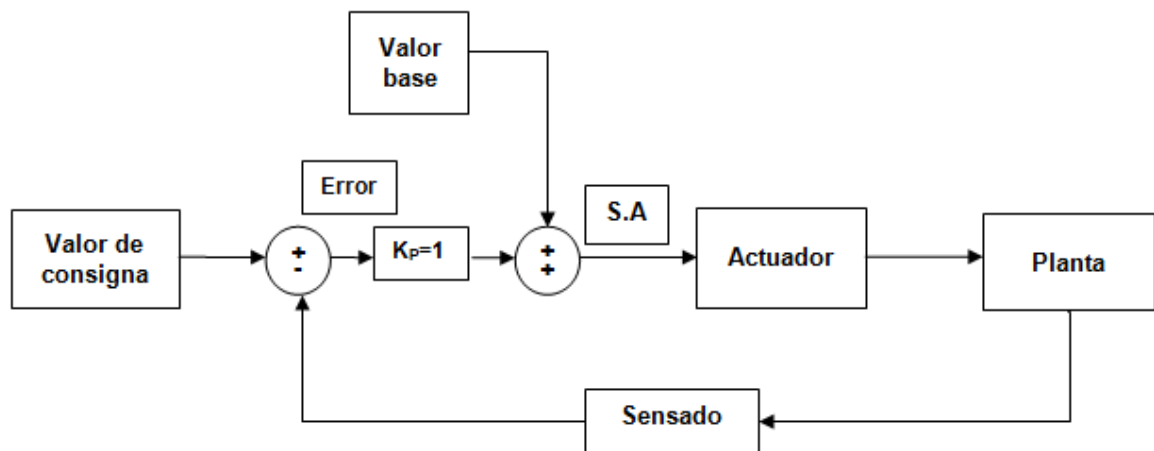
De lo anterior se puede establecer como función de transferencia

$$G(s) = \frac{1}{(3,47092)s + (3199,939314)} \quad (41)$$

#### 4.3.3. CAPITULO 3. Diseño del sistema de control.

Para el montaje del sistema de control de posición, se realiza un circuito de comparación y suma de señales, que realizan la conversión de distancia de ubicación del cuerpo, en tensión de suministro, realizando la variación necesaria en la tensión al momento de la percepción de cambios de posición en el sistema. El circuito utilizado presenta el siguiente diagrama de bloques.

Figura 8. Diagrama de bloques sistema a lazo abierto



Valor de consigna  
Factor de ganancia

Actuador

Planta

Sensado

Error

S.A

Punto de operación

Ganancia relacionada a los niveles de cambio del actuador

Dispositivo de control de cambio

Proceso a controlar

Proceso de verificación de posición

Diferencia entre la señal de sensado y el Set Point

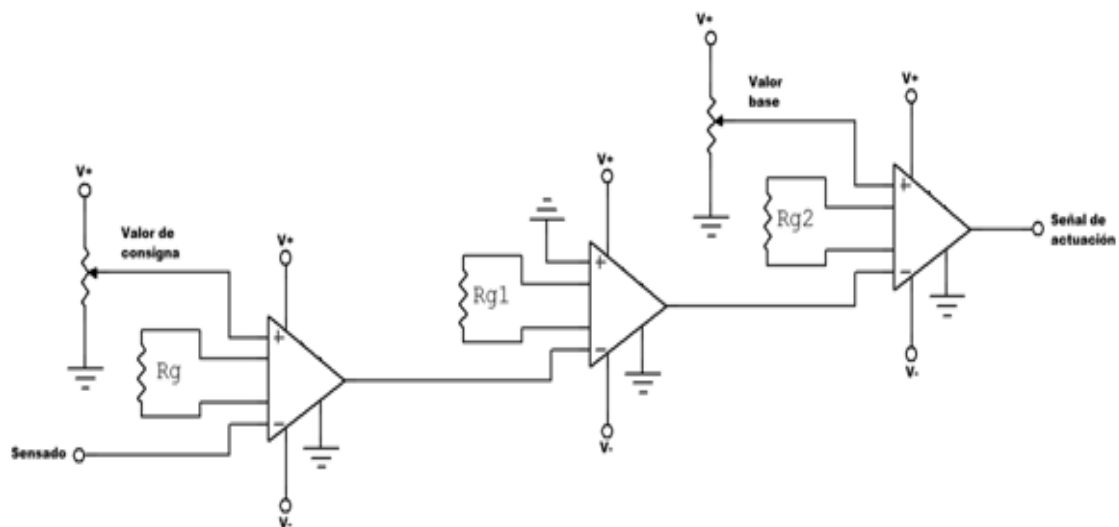
Suma de señales de error y señal con factor de ganancia (Señal de Actuación)

En el diagrama de bloques se muestra el concepto de valor base, el cual nos permite dar inicio al sistema en un valor inicial, en este caso inyecta una corriente inicial y permanente mientras el sensor no detecte la presencia del cuerpo en suspensión, permitiendo dar un apoyo de funcionamiento al sistema y evitando la iniciación del mismo en un valor de referencia 0.

Para las etapas de comparación y de suma de señales se utilizan amplificadores de instrumentación, ya que estos nos permiten obtener resultados con mejor exactitud, y rapidez al momento de operar, dando de la misma manera estabilidad en la lectura de posición real del cuerpo en suspensión. En estas fases los amplificadores presentan niveles de ganancia unitaria ( $G=1$ ), lo que permite que la señal sea aproximada a la real. Para efectos de cambio se realiza la suma de la señal de error con el Valor base, lo que nos permite realizar cambios de niveles de operación del actuador por medio de la señal de actuación.

En la Figura 9, se muestra el circuito de comparación y suma de señales.

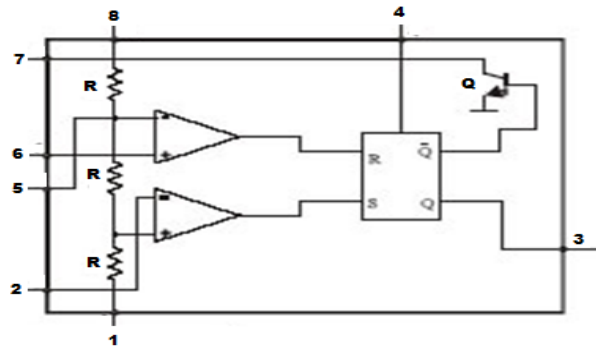
**Figura 9. Circuito de verificación de posición**



Las resistencia  $R_g$ , son las resistencias de caracterización de ganancia, teniendo en cuenta que el circuito presenta una gran sensibilidad a perturbaciones externas.

En el dispositivo de actuación (Actuador) se implementa un multivibrador con variación de ancho de pulso (PWM). Para la construcción del sistema de modulación se utiliza un circuito integrado 555, que nos permite realizar el diseño adecuado. Se establece el siguiente análisis para las ecuaciones de tiempo de carga y tiempo de descarga del capacitor y partiendo del análisis de la arquitectura interna del circuito integrado 555, mostrado en la figura 10.

**Figura 10. Arquitectura interna del circuito integrado 555**



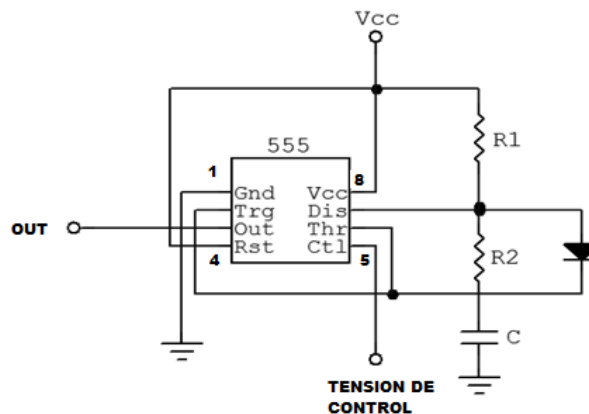
En la arquitectura interna del circuito integrado 555 presenta comparadores que están en los pines 6,5 y 2, donde sus salidas van a un FLIP-FLOP R-S que tiene la siguiente tabla de verdad:

**Cuadro 2. Tabla de verdad FLIP-FLOP R-S**

FLIP-FLOP R-S			
SET	RESET	Q	Q'
0	0	E.A	E.A
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	N.V	N.V
Q'	Estado negado		
E.A	Conserva el estado anterior		
N.V	No valido		

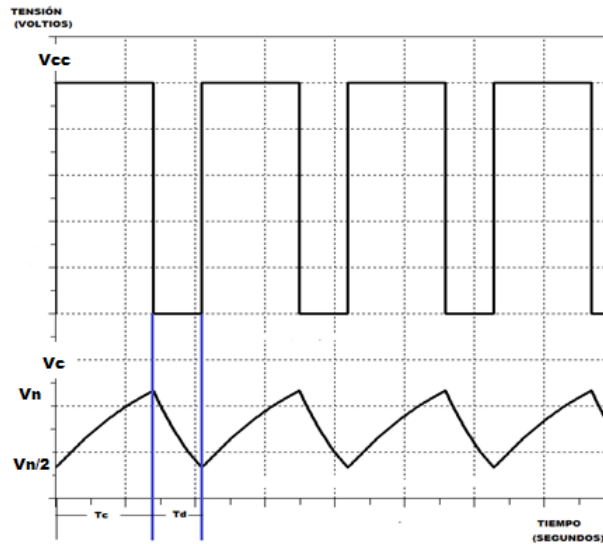
Del circuito de la Figura 11 se tiene el siguiente análisis para establecer los tiempos requeridos:

**Figura 11. Circuito PWM con 555**



En la Figura 12, se muestra la relación de tiempos a utilizar a la salida del actuador, teniendo en cuenta que dependiendo del valor de tensión de control la frecuencia varía en relación al mismo.

**Figura 12. Relación de tiempos de carga y descarga con la señal de salida**



Para los cálculos se tiene en cuenta los siguientes conceptos de tensión.

$V_{CC}$	Tensión de alimentación
$V_C$	Tensión en el capacitor
$V_n$	Tensión de control
$V_f$	Tensión final
$V_i$	Tensión inicial

Teniendo en cuenta que la carga y descarga de un capacitor se realiza de forma exponencial, se establece la ecuación general de análisis.

$$V_C = V_f - (V_f - V_i)e^{t/\tau} \quad (42)$$

$\tau$  Constante de tiempo del capacitor

Para el tiempo de carga se realiza el análisis del circuito con la corriente fluyendo en dirección al capacitor pasando por la resistencia  $R_1$ , donde se establecen las siguientes relaciones.

Donde:

$$\tau = R_1 \cdot C$$

$$V_f = V_{CC}$$

$$V_i = \frac{V_n}{2}$$

$$V_C = V_n$$

Basados en la ecuación 42, se obtiene el tiempo de carga de la siguiente manera

$$V_n = V_{CC} - \left( V_{CC} - \frac{V_n}{2} \right) e^{T_c/R_1 \cdot C} \quad (43)$$

Despejando el tiempo de carga ( $T_c$ ) se obtiene:

$$T_c = \ln \left( \frac{2V_{CC} - V_n}{2(V_{CC} - V_n)} \right) R_1 C \quad (44)$$

Para el tiempo de descarga se realiza el análisis del circuito con la corriente fluyendo en dirección opuesta al capacitor pasando por la resistencia  $R_2$ , donde se establecen las siguientes relaciones.

Donde:

$$\tau = R_2 \cdot C$$

$$V_f = 0$$

$$V_i = V_n$$

$$V_C = \frac{V_n}{2}$$

Basados en la ecuación 42, se obtiene el tiempo de carga de la siguiente manera

$$\frac{V_n}{2} = 0 - (0 - V_n) e^{T_d/R_2 \cdot C} \quad (45)$$

Despejando el tiempo de descarga ( $T_d$ ) se obtiene:

$$T_d = \ln(2) R_2 C \quad (46)$$



De la ecuación 44, se observa que con la variación de la tensión de control, el ciclo útil del sistema varía, lo que hace que la tensión promedio vista en el sistema aumente o disminuya con respecto a la razón de cambio referida a la tensión de control.

Para la implementación y utilización de corrientes requeridas para el correcto funcionamiento del sistema se requiere un interfaz de potencia que permita hacer la conversión y protección del circuito de baja potencia, además adecuando la señal de actuación a un nivel de tensión adecuado para la planta. Para el interfaz de potencia se utiliza un puente H, que nos permite utilizar corrientes más altas y niveles de tensión más altos que el circuito de actuación calculado anteriormente. El puente H, opera de tal manera que la señal a modular, presente una tensión pico igual a la tensión de amplificación del mismo, contando además que la corriente de soporte del circuito integrado es mayor que la necesaria para el funcionamiento de la planta.

La tensión de la planta varía según el valor promedio de la señal modulada, como se muestra en la Figura 13, y está definida por:

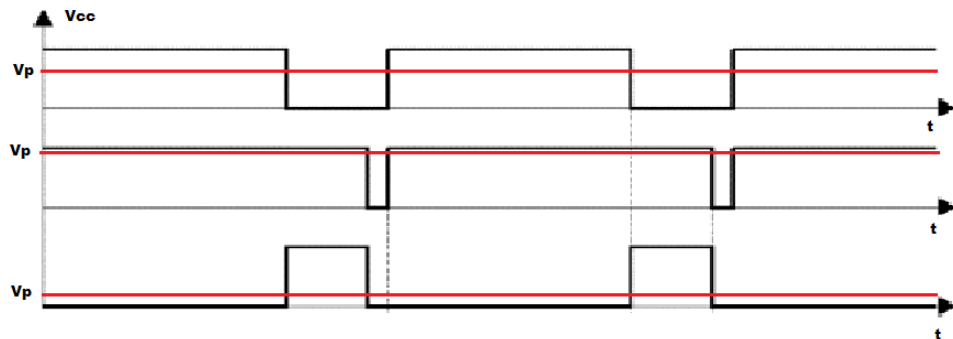
$$V_p = \frac{1}{T} \int_0^T A dt \quad (47)$$

Donde:

$T$  Periodo de la señal con amplitud positiva

$A$  Amplitud positiva de la señal

**Figura 13. Señales con valoración de tensión promedio**



Como la señal presenta una variación en amplitud de 0 V a  $V_{CC}$ , solo se toma la integral definida entre los valores de tiempo establecidos por la parte de actuación alta de la señal, ya que en la parte baja (0 V), la integral es igual a cero.

#### 4.3.4. CAPITULO 4. Montaje del prototipo

Para el montaje del sistema de levitación electromagnética se realizan todos los pasos de verificación de datos y de comportamiento de los elementos, en este caso se debe identificar la tendencia de operación del sensor a utilizar, la interacción del electroimán con el cuerpo que se va a suspender, en este caso un imán, y la correcta operación del circuito electrónico que realizara la operación de control y verificación de posición, ya que de esto depende el correcto funcionamiento del dispositivo de actuación.

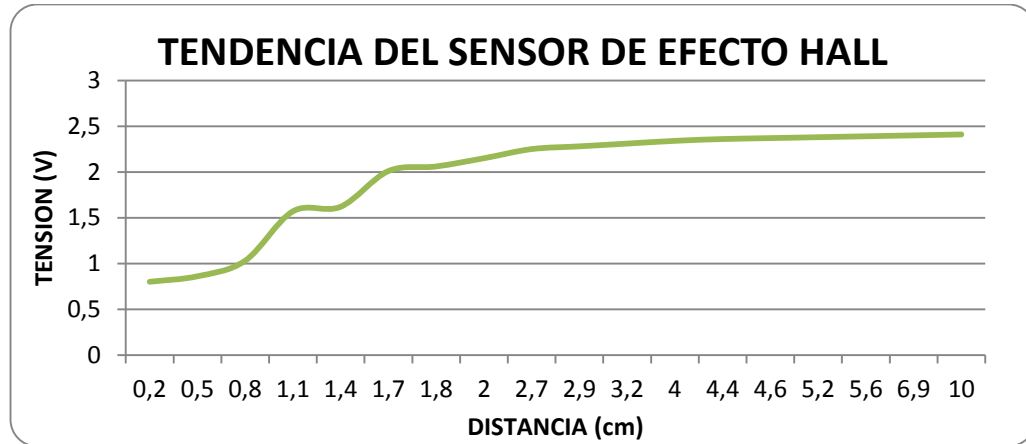
En el diseño se debe tener en cuenta el área de operación para construir una base que permita un dinamismo y una variación necesaria en los parámetros establecidos anteriormente, en este caso se verifican los puntos de operación relacionados con las distancias y teniendo en cuenta que al montar el sistema el campo producido por el electroimán presenta una variación en la medida del sensor, que se comporta como una perturbación, presentando de igual manera un margen de trabajo activo del sistema. Para este caso se realizan el montaje de una base en material de balsa, con las características dimensionales necesarias para cumplir con la necesidad del sistema, donde las dimensiones fueron establecidas por los parámetros mostrados en el Cuadro 3 y el Cuadro 4.

**Cuadro 3. Características de operación del sensor de efecto Hall**

<b>DISTANCIA (cm)</b>	<b>TESION DE SALIDA (V)</b>
0,2	0,80
0,5	0,86
0,8	1,03
1,1	1,57
1,4	1,62
1,7	2,01
1,8	2,06
2,0	2,15
2,7	2,25
2,9	2,28
3,2	2,31
4,0	2,34
4,4	2,36
4,6	2,37
5,2	2,38
5,6	2,39
6,9	2,40
10,0	2,41

En la Figura 14 se muestra la tendencia de operación del sensor de efecto Hall.

**Figura 14. Tendencia de operación del sensor de efecto Hall**



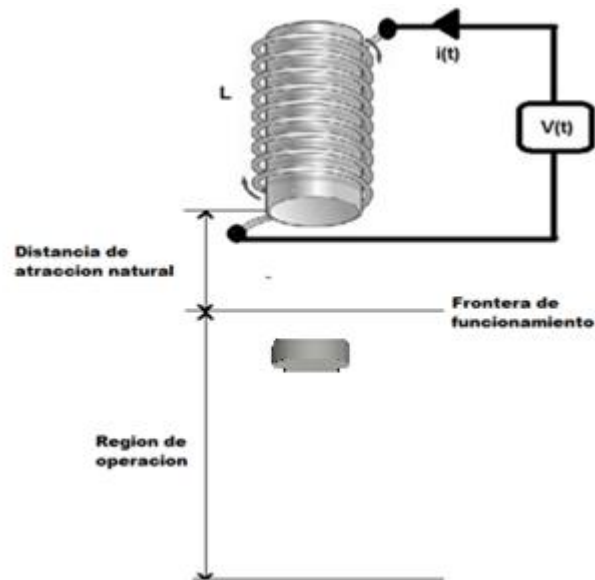
El punto de operación estático del sensor es 2,42 V, y su comportamiento es de aumento o decremento dependiendo de la polaridad del imán. Por condiciones de operación del sistema se toma como referencia el decremento de la señal al acercar el imán al sensor.

**Cuadro 4. Características de operación del electroimán**

PESO	1,1 g	
DISTANCIA (cm)	Tensión (V)	Corriente (A)
2,9	4,1	0,09
3,6	6,0	0,13
3,8	8,2	0,19
3,9	9,4	0,21
4,3	13,0	0,29
4,7	18,1	0,41
5,3	24,1	0,54
5,6	28,0	0,62
5,9	30,0	0,65

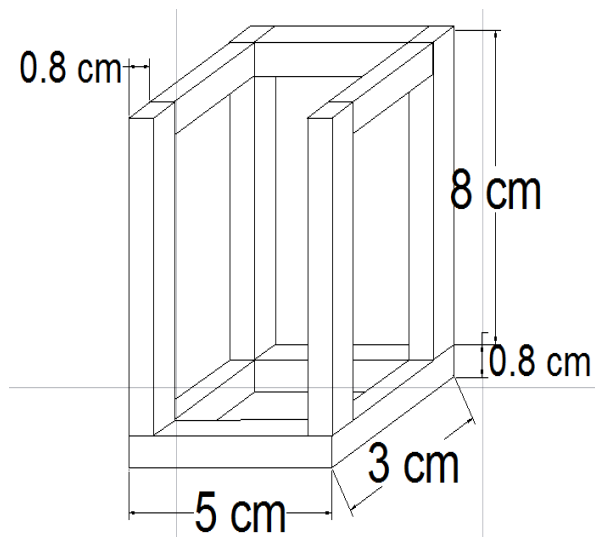
De los parámetros del sistema en temas de sensado y distancia de actuación del electroimán se debe tener en cuenta que de forma natural el núcleo y el imán presentan una atracción, lo que hace que se cree una frontera de trabajo en la que el sistema tenga estabilidad por el campo producido por corrientes y no por sus condiciones naturales, en la Figura 15 se muestra como se establece la frontera y la región de operación del sistema

**Figura 15. Frontera y región de operación del sistema**



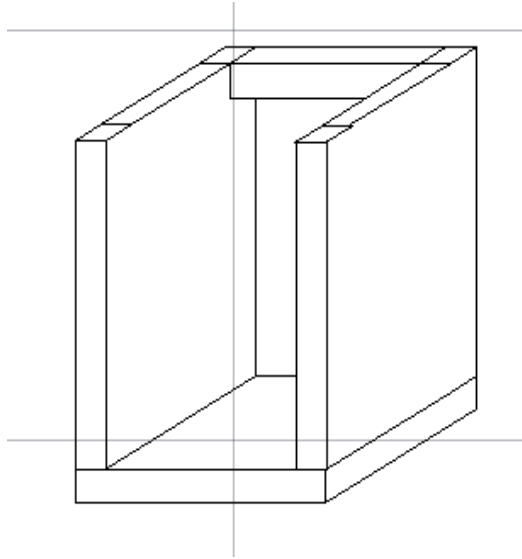
Las distancias de interacción de campos son directamente relacionadas a las tensiones y corrientes suministradas al electroimán. Como las distancias dominantes son las del sensor, se establece un punto de operación del sistema menor al punto de operación estático del sensor y de allí se establecen los valores de la altura necesaria de la base y garantizar las variaciones pertinentes del sistema. Con los parámetros relacionados anteriormente se establece el diseño mostrado en la Figura 16.

**Figura 16. Diseño con dimensiones de marco**



Como terminación final se tiene como diseño, el mostrado en la Figura 17

**Figura 17. Diseño de presentación**



Para la ubicación de los elementos se tiene en cuenta que la fuerza de utilización en el sistema electromagnético es la fuerza de atracción, por lo tanto el electroimán se ubica en la parte superior y el sensor en la parte inferior de la base.

## 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

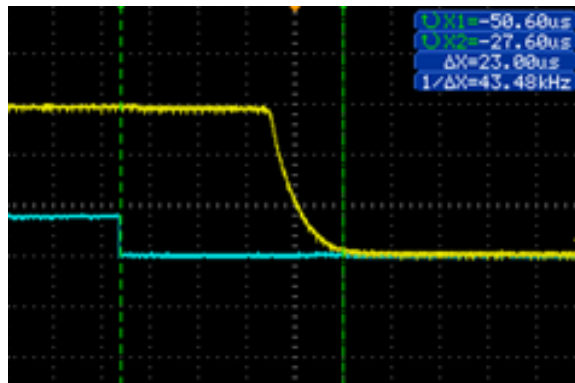
Al momento de iniciar el montaje del sistema de levitación electromagnética, se realizaron pruebas de funcionamiento al electroimán, ya que de este depende el correcto funcionamiento del sistema. Para la caracterización del electroimán se llevo a una prueba de variación de tensión, en donde se determinaron las corrientes asociadas a los distintos niveles de tensión, en consecuencia se tomaron decisiones para la utilización de elementos requeridos, en este caso las fuentes de suministro a utilizar y los elementos de interfaz de potencia.

Se realiza el montaje de un primer prototipo en el que se utiliza un sensor infrarrojo y la implementación de circuitos ON-OFF, conllevando a que el sistema no presentara un comportamiento dinámico, el cual no fue útil al momento en el que el sensor efectuaba la acción de captación, teniendo en cuenta que los sistemas ON-OFF, solo muestran dos estados pertinentes a la captación o no del sensor, lo que hacía que el cuerpo en suspensión no se sostuviera en la frontera que pautaba el sensor, como solución a este problema se implementa la utilización de un sensor de efecto Hall, el cual permite obtener una señal de tensión a su salida, la cual es variable al momento de captar el cuerpo en suspensión (imán), presentando además que la variación de la tensión se hace con respecto a la distancia en la que se encuentra el cuerpo, el cual ayuda a darle dinámica al sistema.

Para el interfaz de potencia se utilizaron inicialmente transistores de potencia tipo TIP NPN, los cuales al momento de soporte de corriente y señales de entrada a altas frecuencias presentaban calentamiento y poca eficiencia de saturación, lo que indicaba la utilización de disipadores de potencia. Al momento de instalar el dispositivo transistor con su disipador, presentaban un buen funcionamiento por un tiempo, pero al alcanzar temperaturas altas provocadas por la corriente de flujo por el mismo, se muestra que la señal PWM de alta potencia, presentaba distorsiones y un desfase de 43,48kHz, lo que le quitaba eficiencia y precisión al funcionamiento del sistema, indicando de esta manera un problema ya que el tiempo de respuesta se necesita instantáneo, como se muestra en la

Figura 18.

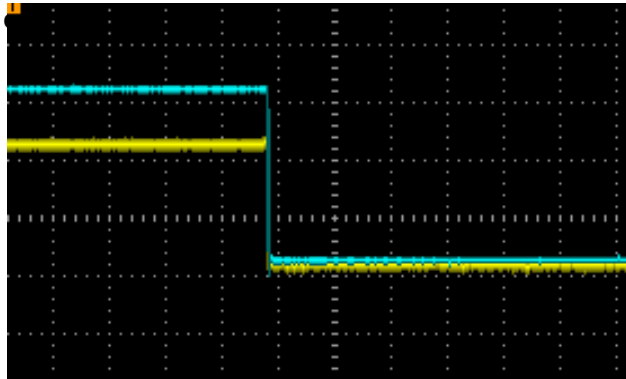
**Figura 18. Medición de desfase y distorsión de señal PWM con transistores tipo TIP NPN de baja frecuencia**



Como solución al inconveniente se realiza la utilización de un puente H (circuito integrado L293D), con arreglo de amplificadores y diodos, el cual permite la utilización de corrientes y tensiones más altas, y permitiendo la utilización de frecuencias altas en la señal de entrada, evitando distorsiones en la señal de potencia como se muestra en la Figura 19. , dando así, estabilidad y sujeción a los parámetros que se necesitan para el buen funcionamiento del sistema. El comportamiento de la señal PWM de baja potencia y la señal PWM de alta potencia a la salida del puente H, se muestra en la

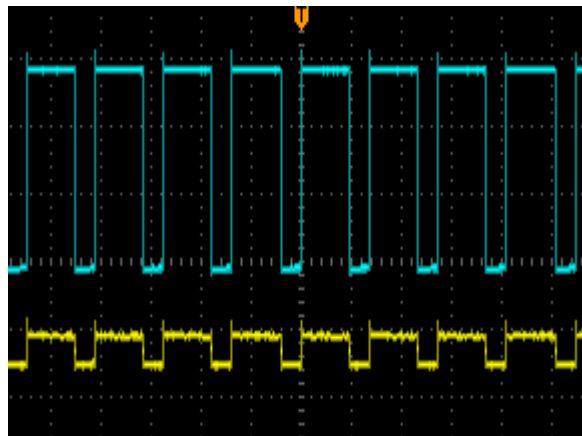
Figura 20.

**Figura 19. Medición**



**H de alta frecuencia**

**Figura 20. Comportamiento de señales PWM con puente H L293D**



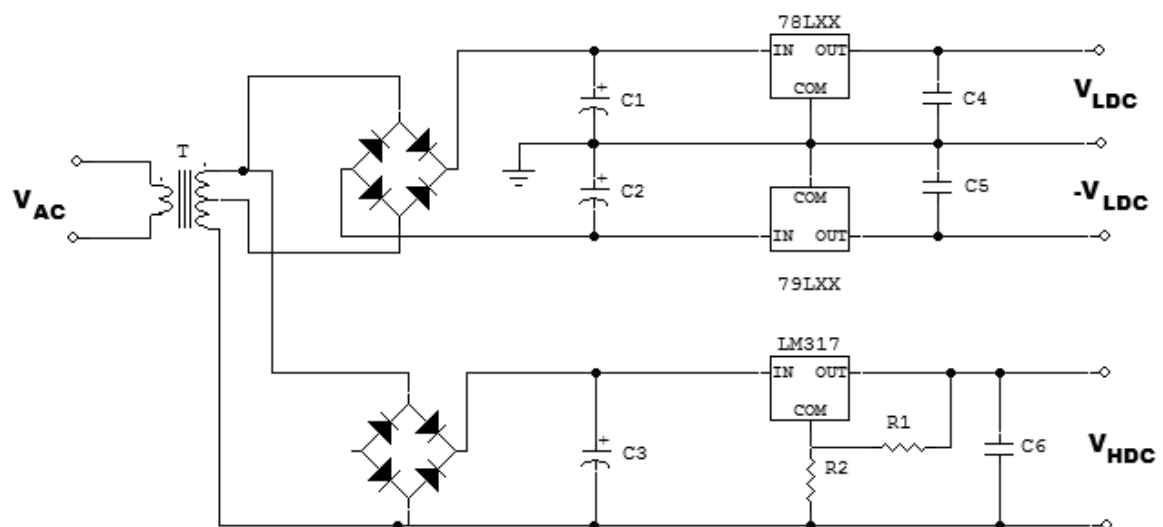
Para el sistema de control de posición se utiliza los conceptos de generación de error, el cual realiza el funcionamiento del sistema basado en el mismo, y la utilización de valor base, lo que hace que el sistema este desde un inicio con una potencia inyectada determinada. Con fines de dar precisión y dinámica al sistema se utiliza un circuito proporcional para cambiar su dinámica, acomodando dicho valor a la necesidad y haciendo que presente actuación ante distorsiones, mas no



dando estabilidad total ante ellas, esto quiere decir que el comportamiento del sistema ante distorsiones es menos turbulento, pero del mismo modo hace que presente sensibilidad a ellas. El valor base ayuda a que el valor de la constante proporcional se disminuya, en el caso de este sistema el valor proporcional contiene valores menores o iguales a la unidad ( $K_p \leq 1$ ), donde se observa que cuando el valor es menor que 1, el sistema presenta variaciones de tensión más rápidas, mientras que con un factor proporcional unitario la variación de tensión es más lenta.

Para la alimentación del circuito se utilizan fuentes reguladas con transformador, como se muestra Figura 21.

**Figura 21. Fuentes reguladas con transformador**



Donde la tensión de entrada al transformador ( $V_{AC}$ ), representa la tensión alterna suministrada por la red, donde a la salida del transformador se utiliza un puente rectificador de onda completa y capacitores de rizado, los cuales se recomienda que sean de valores grandes para tener un mejor régimen de rizado y asegurar la labor eficiente de los reguladores de tensión.

Para la fuente de tensión dual se utilizan reguladores de las familias 78LXX y 79LXX, los cuales se utilizarán para la alimentación de los circuitos electrónicos, presentando a sus salidas los niveles de tensiones bajas ( $V_{LDC}$  y  $-V_{LDC}$ ).

Para la fuente de tensión en la parte de potencia ( $V_{HDC}$ ), se utiliza un regulador LM317, el cual permite utilizar niveles de tensión más altos y presenta un buen soporte de corrientes, lo que permite la utilización de potencia más altas.

Con los cálculos y los problemas resueltos, se implementó el montaje del sistema como se muestra en la Figura 22.

**Figura 22. Prototipo de levitación electromagnética**

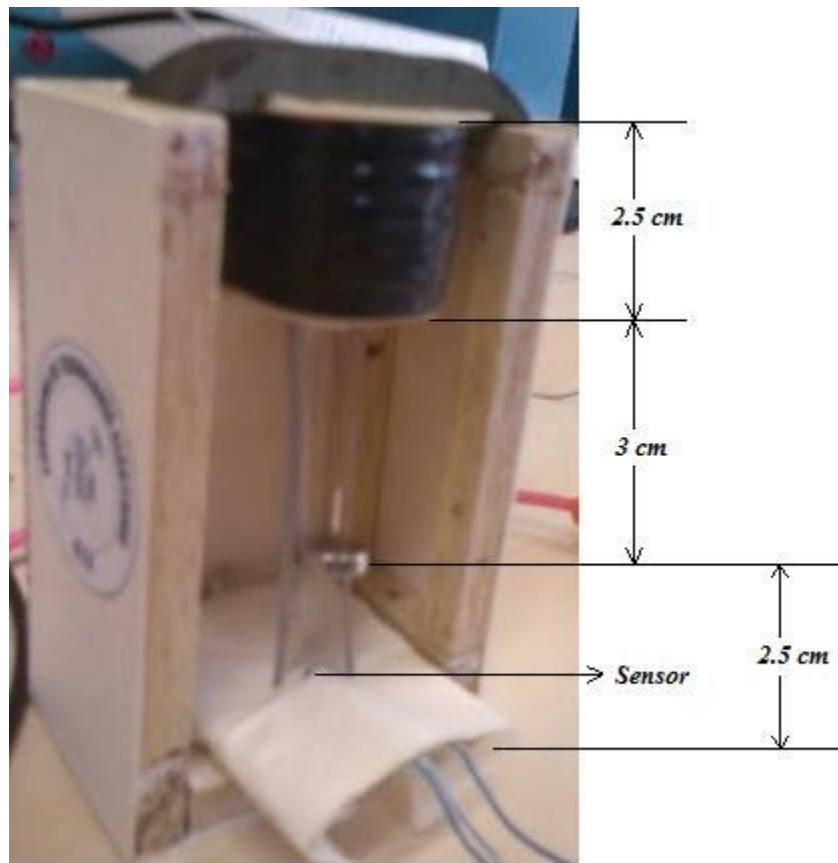


Figura 23. Prototipo final de levitación electromagnética



## **7. CONCLUSIONES**

- Para los sistemas de control de levitación electromagnética se debe tener en cuenta que los sistemas ON-OFF, al presentar solo dos estados de actuación, no son útiles ya que no permiten obtener dinámica en el funcionamiento.
- Para el análisis electromagnético, se deben tener claros los conceptos de circuitos magnéticos y de campos inducidos por corrientes, y de la misma manera dar solución a la comprensión del funcionamiento magnético del sistema.
- Para la escogencia de la bobina se debe tener en cuenta el conocimiento constructivo básico, que indica que para mejoramiento del campo magnético resultante, se debe utilizar un núcleo de material ferromagnético, y el número de espiras debe ser lo suficientemente alto en concordancia con el calibre del conductor empleado.
- Para el soporte de corriente se debe tener en cuenta el calentamiento o disipación de potencia en forma de calor en los dispositivos, ya que este cambia las propiedades de funcionamiento del mismo.
- En la escogencia del sensor se debe tener en cuenta la dinámica que el mismo puede presentar al momento de captar una variación en la variable de medición.

## 8. TRABAJOS FUTUROS

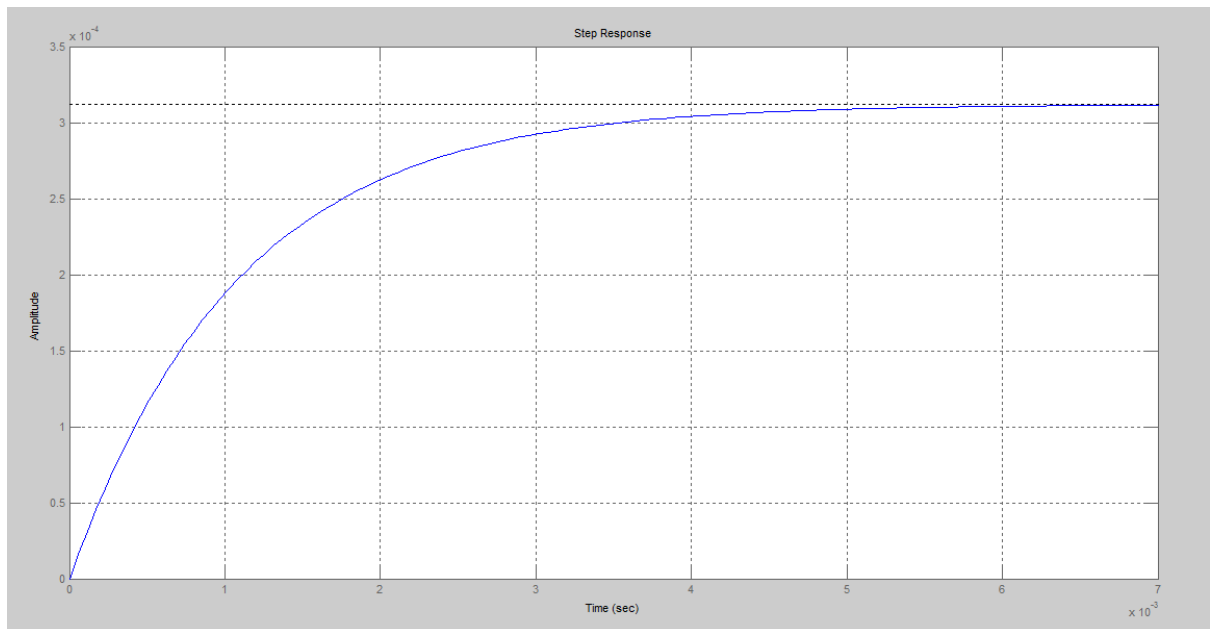
El enfoque del trabajo es dirigido al análisis electromagnético de sistemas de levitación, pero se tiene en cuenta que se puede mejorar el sistema por medio de los conceptos que de allí se deducen, dando como precedente un sistema de levitación con alta sensibilidad a los cambios bruscos (perturbaciones) en el mismo.

Para el diseño del sistema de control resistente a cambios bruscos (distorsiones externas), se debe tener en cuenta las variaciones en frecuencia del sistema obtenidas por medio de la función de transferencia, y de la misma manera establecer cuál es el comportamiento del sistema.

Para presentar la gráfica de la función de transferencia se utiliza el MATLAB, el cual nos permite establecer los puntos de operación y los parámetros necesarios para el punto de control óptimo.

$$G(s) = \frac{1}{(3,47092)s + (3199,939314)}$$

**Figura 24. Tendencia en el dominio de la frecuencia**



La Figura 24 muestra la tendencia de la función de transferencia en el dominio de la frecuencia, teniendo en cuenta que es la representación de un sistema de primer orden.

Con la gráfica en el dominio de la frecuencia se puede deducir, la constante de tiempo ( $T$ ), tiempo de establecimiento ( $Ts$ ), tiempo de retardo o de subida ( $Tr$ ).

Dónde:

$$T = \frac{1}{a} \quad (48)$$

$$Ts = 5 * T \quad (49)$$

$a = 3199,939314$  , la constante  $a$  es el término independiente de la función de transferencia, se reemplaza en la ecuación 48 y se obtiene que:

$$T = 0,0003125 \text{ s}$$

Con el valor obtenido anterior mente y remplazándolo en la ecuación 49 se obtiene que:

$$Ts = 0,0015625 \text{ s}$$

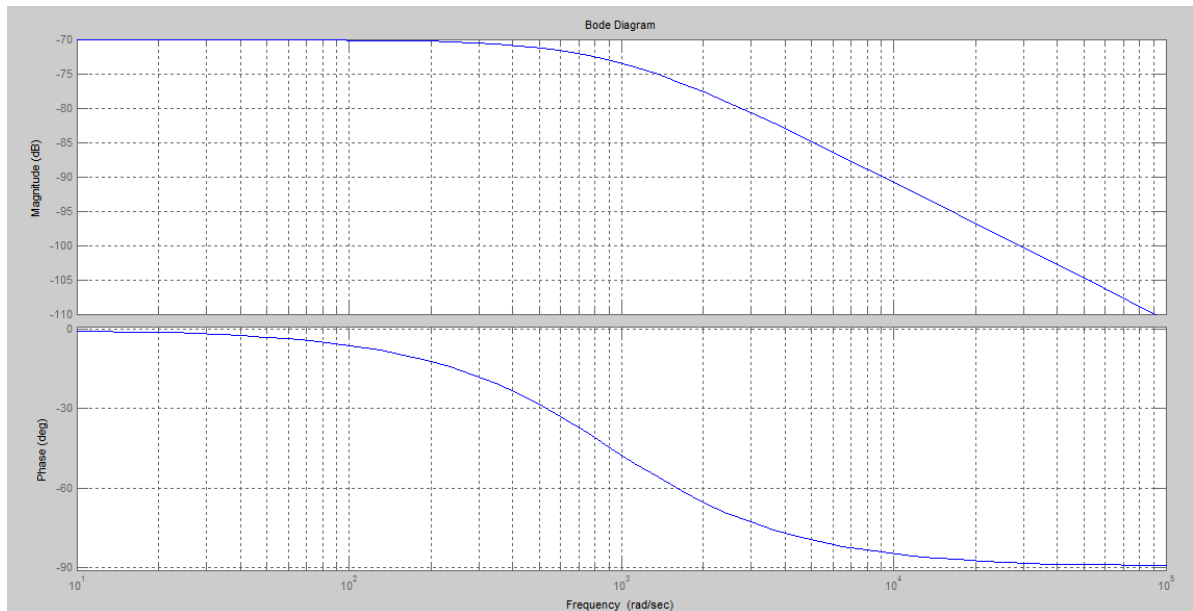
De la Figura 24 se puede obtener el valor del tiempo de retardo o de subida, con el siguiente método; Trazar una recta tangente al punto de inflexión de la curva de respuesta. Donde la hay la intersección de la recta con el eje del tiempo se halla el tiempo de retardo o de subida.

Dónde:

$$Tr \cong 0,0019 \text{ s}$$

Por medio del diagrama de Bode de la misma función se obtiene el ancho de banda (BW) que es aproximadamente igual a la frecuencia natural del sistema en radianes por segundo  $\left(BW \approx W_n \frac{rad}{seg}\right)$ .

**Figura 25. Diagrama de Bode del sistema**



Una vez finalizado el proyecto y teniendo como base el diseño construido, surgen una serie de posibilidades a desarrollar. Uno de los trabajos a desarrollar es la utilización de un tipo de control PID, basado en control analógico, teniendo en cuenta que se pueden cambiar algunos elementos del sistema de control de posición, por otros de mejor eficiencia y que permitan un desarrollo más elaborado y estable del mismo.

Para el proceso de control se pueden tener en cuenta no solo los sistemas analógicos, sino también los sistemas de control digital o inteligente, como los sistemas de control programables tales como microcontroladores, DSP, autómatas, sistemas de adquisición de datos, entre otros.



## 9. BIBLIOGRAFIA

1. **PÉREZ ARANGO, José David.** *Distribución de Energía Eléctrica por Inducción Magnética "Redes Inalámbricas"*. [Escuela de Tecnología Eléctrica] Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
2. **CABALLERO VALERIN, Arón; GOMEZ JIMENEZ, Jhonny; REAL DURAN, Wilberth.** *Sistema de Levitación para Medios de Transporte*. [Escuela de Ingeniería Electrónica] Cartago, Costa Rica : Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2010.
3. **BRAVO, Luis; MOGROVEJO, Wilson; QUEZADA, Fausto; RODRÍGUEZ, René.** *Levitador Electromagnético, Teoría de Control*. [Universidad de Cuenca] Cuenca, Ecuador, Ecuador : Facultad de Ingeniería Eléctrica, 2007.
4. **CAMPOS HERNANDEZ, Paul Javier.** *Construcción y Control de un Levitador Electromagnético*. [Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital] Tijuana : Instituto Politécnico Nacional, Agosto de 2008.
5. **CHICO GARRIDO, Maria Elena y RONDÓN PINILLA, Eliana Rocío.** *Diseño de una sistema de control para un levitador Magnético que opere sumergido en fluidos con viscosidades y densidades sustancialmente diferentes a la del aire*. [Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones] Bucaramanga, Colombia : Universidad industrial de Santander, 2007.
6. **Word Reference.** Electroimán. [En línea] 2005. [Citado el: 27 de Marzo de 2013.] <http://www.wordreference.com/definicion/electroim%C3%A1n>.
7. **Universidad Panamericana.** Bobina. *Via Satelital*. [En línea] Marzo de 2006. [Citado el: 27 de Marzo de 2013.] [http://www.viasatelital.com/proyectos\\_electronicos/bobina.htm](http://www.viasatelital.com/proyectos_electronicos/bobina.htm).
8. **Larousse Editorial, S.L.** Ferromagnetismo. *The Free Dictionary*. [En línea] [Citado el: 27 de Marzo de 2013.] <http://es.thefreedictionary.com/ferromagnetismo>.
9. **Espasa-Calpe.** Sensor. *Word Reference*. [En línea] 2005. [Citado el: 27 de Marzo de 2013.] <http://www.wordreference.com/definicion/sensor>.
10. **Graf, Rudolf F.** Dinamo. *Diccionario de Electrónica*. Madrid : Piramide S.A, 1984.
11. The free dictionary. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2014.] <http://es.thefreedictionary.com/magnetiza>.

12. *Incidencia del derecho en la creación y el funcionamiento de las joint ventures*. 2000.

13. Investing. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2014.] <http://es.investing.com/equities/thyssen-krupp>.

14. **Staff del MIT.** *CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES*. Cambridge, Massachusetts : s.n., 1943.